

Propulsão Elétrica Espacial

Maurício Massaki Asano
Instituto de Física
Universidade de Brasília (UnB)
Brasília-DF, Brasil

José Leonardo Ferreira
Instituto de Física
Universidade de Brasília (UnB)
Brasília-DF, Brasil

Resumo—A necessidade de descobrirmos nosso universo por meio de satélites e sondas faz com que a tecnologia de propulsores fosse aprimorada consideravelmente nas últimas décadas. A inevitabilidade do avanço da tecnologia espacial e estudo dos diversos fenômenos do universo faz-nos perceber que precisamos cada vez percorrer distâncias cada vez maiores distância em menor tempo para o avanço da ciência. A partir do supracitado entende-se que estudar e evoluir os propulsores elétricos é de fundamental importância e é uma das causalidades desse relatório. O foco principal do trabalho será a descrição dos três propulsores abaixo:

- 1) Hall;
- 2) Hdlt;
- 3) Pion.

Concomitantemente, nesse trabalho também será feita uma breve linha do tempo do desenvolvimento dos propulsores elétricos e também será explanado, brevemente, sobre os conceitos de plasmas.

Index Terms—Propulsores elétricos

I. INTRODUÇÃO

Ideias sobre propulsão de foguetes por cargas elétricas vem desde o ano de 1906 por Robert Goddard e Hermann Oberth na década de 1930. Entretanto, somente em 1958, houve o início dos trabalhos para propulsores elétricos.



Figura 1. Foto de Robert Goddard, pai da propulsão moderna de foguetes, ao lado de seu primeiro foguete a combustível

A principal causalidade para a construção de propulsores que utilizam a descargas de íons e elétrons na década de 60 são os trabalhos de Ernst Stuhlinger (1955). Em um dos artigos realizado pelo físico mostrou que a massa correspondente do propulente utilizado nas viagens preenchia uma alta porcentagem da massa da aeronave, estima-se que uma viagem hipotética para Marte teria 25 vezes menos peso ao final do trajeto do que no inicial. A partir do supracitado, Stuhlinger argumentou que uma solução para a problemática era utilizar propulsores que utilizam de cargas elétricas que ofereciam menos peso que os propulsores a combustível. Após conseguir ter aderência da sociedade científica, foi intensificado o desenvolvimento de propulsores elétricos para viagens aeroespaciais.

Os estadunidenses seguiram modelo proposto por H. R. Kaufmann, onde o modelo, mais simples que os anteriores, baseava em uma ionização a bombeamento de elétrons por um filamento catódico. Na década de 60, foi realizado pela NASA os primeiros lançamentos de foguetes que utilizavam *propulsores elétricos*, onde suas fontes eram o mercúrio e, posteriormente, o Césio. A escolha dessas fontes está nas características que esses dois elementos possuem, tais como suas elevadas seções de choque, baixas energias de ionização e elevadas massas atômicas (Esses conceitos serão mais bem explanados no embasamento teórico). Após checar que essas fontes de energia são extremamente reativas, houve a necessidade de mudar os combustíveis para os gases nobres.



Figura 2. Foto da Sonda Deep Space

Por outra via, os soviéticos utilizaram do efeito Hall como fonte aceleradora, comparado com uma fonte de Kaufmann, o propulsor soviético é mais simples, tanto no sistema elétrico

como no controle da fonte. Para fazer um comparativo entre os propulsores, a União Soviética realizou mais de 16 viagens de lançamento de sondas ao espaço, no mesmo intervalo de tempo o Estados Unidos realizaram somente uma viagem de alto nível com um propulsor iônico com a Sonda Deep Space. Após o fim da União Soviética (1990), os projetos de propulsão elétrica foram transferidos tanto para a França (CNES) como para o Estados Unidos.

Viagens espaciais notórias recentes, tais como sonda a SMART-1 pela ESA (2003) e os recentes lançamentos de satélites pela SPACE-X (2019) também utilizam da tecnologia de propulsão Hall e apontam que a propulsão elétrica é a mais indicada, atualmente, para viagens de alto alcance. Também deve citar que há diversas estratégias para atingir elavadas velocidades de exaustão. Tem-se três tipos de tecnologias de principais de propulsão elétrica, tal como:

- 1) Propulsão eletrotérmica: Em que o propulsor é aquecido por algum processo elétrico, posteriormente, expandido através do bico.
- 2) Propulsão eletrostática: Em que o propulsor é acelerado pela força eletrostática, após, para partículas ionizadas.
- 3) Propulsão eletromagnética: Em que o propulsor é acelerado pela combinação de forças elétricas e magnéticas.

Posteriormente, as tecnologias de propulsores serão explanadas com maior detalhamento.

II. EMBASAMENTO TEÓRICO

Nesta seção serão explanados alguns conceitos de plasmas, como dito na introdução, os principais tipos de propulsão elétrica e alguns outros conceitos necessários para explanação.

A. Livre caminho médio

Definido pela maior distância em que a partícula não realiza qualquer colisão com outra partícula. Para plasmas, isso deve ser mais generalizado, sendo a maior distância que a partícula realiza sem choque com outra partícula ou parede da cápsula.

B. Seção de Choque

Se ao incidir um feixe de luz sobre um determinado alvo, o número de núcleos por unidade de tempo que irão interagir com o alvo (N) é proporcional ao número de íons por unidade de tempo no feixe (Intensidade do feixe I) e o número que átomos que atingem o alvo por unidade de área (n):

$$N \propto In \quad (1)$$

Para que haja proporcionalidade entre as parâmetros necessita de um regulador, que é a representação dos processos físicos envolvidos, essa constante é chamada de seção de choque e é representada pela letra σ .

$$N = \sigma In \quad (2)$$

Portanto, seção de choque é definida como a área efetiva que o projétil deve entrar para interagir com o alvo, ou, para melhor interpretação, a probabilidade de interação entre as partículas. Interessante também citar que essa seção de choque é válida para qualquer processo, desde que não houvesse variação tipo de interação nem a região do espaço onde está acontecendo a interatividade entre as partículas.

Como visto, a seção de choque revela informações pertinentes acerca da interação entre que acontece entre as partículas. Para maior detalhamento deste parâmetro, pode ser calculada em meio a seção de choque diferencial.

$$dN = \phi_a n_b \sigma_{el}(\theta, \phi) d\Omega \quad (3)$$

Onde o fator de proporcionalidade, ou seja, a seção de choque diferencial é igual a:

$$\sigma_{el}(\theta, \phi) = \frac{d\sigma_{el}}{d\omega} \quad (4)$$

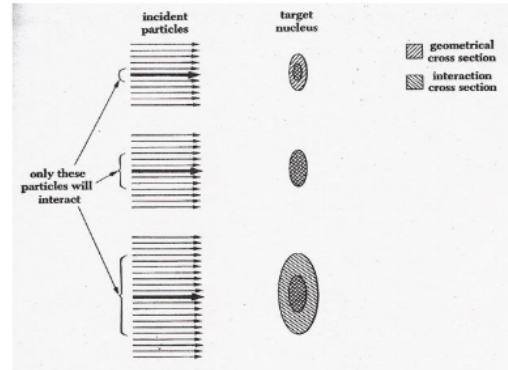


Figura 3. Representação da área de seção de choque, cada núcleo apresenta uma seção de choque dependendo da sua área de interatividade

C. Energia de Ionização

Para extrair os elétrons mais externos do átomo, é necessário uma certa quantidade de energia. Esse parâmetro depende, principalmente, quão ligado o elétron está ao seu núcleo, dependem, majotariamente, de dois fatores:

- 1) Carga nuclear; (Número de prótons)
- 2) Tamanho de átomo. (É expresso pelo raio atômico)

Quanto maior a carga nuclear da partícula e menor o raio atômico maior a atratividade da nuvem eletrônica com o núcleo, aumentando a energia necessária para ionização. Para diminuir a energia de ionização, pelo citado acima, seria uma menor carga nuclear e maior raio atômico. Deve-se ressaltar que para cada elétron retirado da nuvem eletrônica aumenta-se a energia de ionização.

D. Avalanche de Elétrons

Para explanação da avalanche de elétrons é necessário apresentar seus parâmetros de avaliação do fenômeno físico. Em primeiro termo, tem-se a fórmula de Townsend de crescimento de corrente elétrica I em relação ao coeficiente de ionização $\alpha(x)$, em relação a sua interferência espacial.

$$I = \frac{I_0 e^{\int_0^d \alpha(x) dx}}{1 - \int_0^d w(x) e^{\int_0^x \alpha(x) dx} dx} \quad (5)$$

Onde I_0 é a corrente inicial de ionização, d a distância dos eletrodos, $w(x)$ é definido como número de elétrons produzidos por processos secundários, por elétron e por unidade de trajetória em direção ao campo elétrico. $\alpha(x)$ é o primeiro coeficiente de Townsend, ao qual tem a função de descrever o acréscimo de cargas e que representa a quantidade de elétrons secundários formados após as colisões inelásticas por elétrons primários. O segundo coeficiente de Townsend γ e a relação entre o primeiro coeficiente $\alpha(x)$ e $w(x)$. Onde γ representa a produção de elétrons por processos secundários.

Usualmente, $w(x)$ não é facilmente quantificado em parâmetros físicos, logo, utiliza-se a média ao longo do espaçamento entre os eletrodos.

Considerando um campo uniforme, considera-se que $\alpha(x) = \alpha$, logo tem-se a expressão:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(\alpha d - 1)} \quad (6)$$

Desprezando a formação de elétrons por processos secundários, obtém-se:

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (7)$$

O livre caminho médio λ do gás depende da temperatura e da pressão, adquire-se que:

$$\lambda \propto \frac{T}{P} \quad (8)$$

Considerando a distribuição estatística de livres caminhos médios, o número de fenômenos ionizantes α é igual a:

$$\alpha = \frac{1}{\lambda e^{\frac{L}{\lambda}}} \quad (9)$$

Onde L é a distância mínima que um elétron deve percorrer para obter energia cinética o suficiente para ionização do gás.

Posteriormente, faz-se algumas arbitrariedades relacionando parâmetros, $\gamma = \gamma_1 p_1 / P_1$ e $A = 1 / \gamma_1 p_1$ e $B = A_1 / \gamma_1 p_1$, tem-se que a expressão torna-se:

$$\frac{\alpha}{P} = A e^{-B \frac{P}{E}} \quad (10)$$

Relacionando anterior com a lei dos gases nobres, obtém-se:

$$\frac{\alpha}{N} = A e^{-B \frac{N}{E}} \quad (11)$$

A razão entre E/A é chamada constante de Townsend, ao qual é definida como sendo $Td = 10^{-21} V m^2$. As constantes A e B relacionam com o gás e sua razão é igual ao potencial de ionização:

$$Vi = \frac{A}{B} \quad (12)$$

E. Lei de Paschen

A tensã de ruptura em uma descarga DC é determinada pelo tipo de gás, pressão do sistema e dimensões do tubo onde ocorre a descarga.

F. Definição, Caracterização e Produção do Plasma

Plasma é definido como um gás neutro (visto macroscopicamente), contituido de moléculas neutras, átomos e elétrons livre, onde, juntos, apresentam interação Coulumbiana. Para esse conjunto de partículas carregadas serem consideradas a plasma, elas devem atender a três fundamentos básicos:

- 1) Quando potenciais elétricos estiverem presentes, o plasma devem blindá-los: As partículas de carregadas do plasma envolvem os potenciais de um modo que limita o efeito do potencial elétrico de cargas mais afastadas. Essa distância limite, denomina-se comprimento de Debye. Dada pela equação abaixo:

$$\lambda_D = \left(\frac{\varepsilon_0 k_B T}{n e^2} \right)^{0,5} \quad (13)$$

Onde ε_0 é a constate dielétrica, k_B é a constante de Boltzmann, T é a temperatura das partículas, n é a densidade de partículas e e é a carga elementar.

- 2) Formando a *esfera de Debye* por (1), necessita-se que o número de portadores na esfera seja suficientemente grande.

$$N_D = \frac{n 4 \pi \lambda_D^3}{3} \quad (14)$$

Sendo N_D a esfera de Debye.

- 3) Outra característica importante do plasma é sua neutralidade macroscópica de sua carga. Quando há uma perturbação no plasma, origina-se campos elétricos que influenciam os movimento das partículas para a restauração da neutralidade. Esse efeito acontece em uma

frequência específica, chamada frequência de plasma, determinada pela expressão a seguir:

$$\omega_p = \left(\frac{ne^2}{m\varepsilon_0} \right)^{0.5} \quad (15)$$

Onde m é a massa da partícula. As colisões que acontecem no plasma, de partículas ionizadas e moléculas neutras faz com que, gradativamente, diminua sua frequência. Cita-se que para que não o plasma não se torne um gás neutro, é de suma importância que a frequência de colisões seja menor que a do plasma.

Basicamente, o plasma é obtido de três processos principais:

- 1) Aumento de Temperatura;
- 2) Foto-ionização (na qual as moléculas do gás neutro absorvem fótons com energia $\geq$ que a energia de ionização desses átomos);
- 3) Descarga elétrica. Onde um campo externo aplicado a um gás acelera elétrons livres a energias suficientemente elevadas para ionizar outros átomos por colisões. Nosso foco nesse tipo de obtenção do plasmas, visto que, é o que é utilizado nos propulsores.

G. TRL

Os níveis de prontidão de tecnologia (Technology Readiness Levels – TRL) são um tipo de sistema de medição usado para avaliar o nível de maturidade de uma determinada tecnologia. Cada projeto de tecnologia é avaliado em relação aos parâmetros para cada nível de tecnologia e recebe uma classificação de TRL com base no progresso dos projetos (NASA). Pode ser definido pela seguinte classificação:

- 1) TRL -1 - Prova de Conceito;
- 2) TRL 0 - Propostas de melhorias e novos conceitos;
- 3) TRL 1 a 4 - Projeto e teste de protótipos para testar propostas;
- 4) TRL 5 a 6 - Compactação e preparação do protótipo para validação de parâmetros de voo;
- 5) TRL 7 a 8 - Desenvolvimento de Protótipo de Modelo de Engenharia para entregar para a indústria

H. TRL

III. PROPULSOR HALL

O propulsor Hall está um conjunto chamados propulsores eletromagnéticos. Esse tipo de tecnologia funciona a partir do plasma de um propelente que é acelerado por arranjos de campos elétricos e magnéticos. Retirando o Hall, que será melhor explanado, destaca-se os propulsores:

- 1) Propulsores magnetoplasmadínamicos (MPD); (O propulsor MPD produz um empuxo extraordinário, tal que é um entre os principais propulsores a causar tanto empuxo assim. É capaz de converter vários Megawatts (MW) de potência elétrica em empuxo. Concomitantemente, detém de velocidades de exaustão típicas de propulsores iônicos. É um dos melhores propulsores para viagens de longa duração e alcance.)

- 2) Propulsores a plasma pulsado; (Usado, principalmente, na correção de órbita dos satélites)

Retornando ao foco desse tópico, o propulsor a plasma do tipo Hall utiliza campos magnéticos associados a um campo elétrico para acelerar um plasma de baixa densidade e produzir empuxo.

O campo magnético radial é produzida por duas fontes cilíndricas, que podem ser eletroímãs ou ímãs permanentes. O canal de aceleração é preenchido com um gás de baixa densidade. Em meio a esse gás passa uma corrente entre cátodo e o ânodo, formando o plasma.

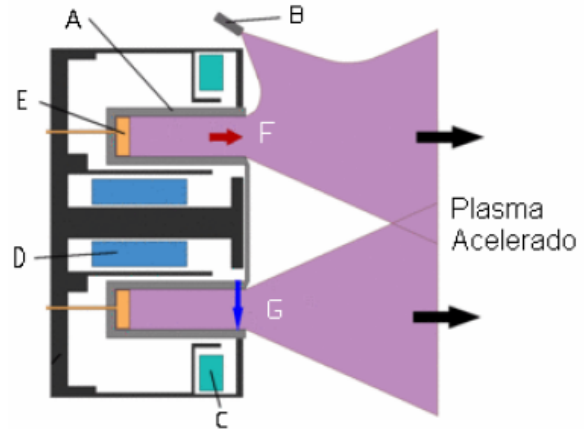


Figura 4. Corte longitudinal no propulsor Hall, A é o canal de aceleração, B é o Cátodo, C são os eletroímãs, D é uma fonte de campo magnético, junto a C, E é o ânodo, F indica a orientação do campo magnético e G seta indicativa da orientação do campo magnético.

As partículas ionizadas que estão sobre o efeito do campo elétrico interagem com o campo magnético para produzir, pelo efeito hall, uma corrente, denominada corrente Hall.

Dada a explanação de como acontece a propulsão eletromagnética, vê-se a necessidade de descrevê-lo:

Vantagens

- 1) Apresenta alto impulso específico; (visto que é um propulsão iônico)
- 2) Alta ionização do propelente.

Desvantagem

- 1) Baixo empuxo (Pois atuam com plasmas de baixa densidade e, concomitantemente, eventuais falhas devido à convergência do feixe de plasma ejetado).

Uma informação que não foi citada na introdução é que os estadunidenses também começaram a desenvolver o propulsor Hall, entretanto, o foco dos E.U.A foram mais focados nos propulsores eletrostáticos.

IV. PROPULSOR HDLT

O Helicon Double Layer Thruster (ou Propulsor a plasma a base de ondas helicons e camada dupla) é um propulsor que gera impulso por antenas de RF (rádio frequência) para criar o plasma, sem necessitar de eletrodos internos. Este propulsor



Figura 5. Propulsor SPT, desenvolvido pelos soviéticos na Guerra Fria, os elétrons que são emitidos pelo cátodo são redirecionados para o canal de aceleração, originando a corrente Hall. O gás que é injetado neste canal é transformado em plasma por impactos eletrônicos, posteriormente, é acelerado pelos campos magnéticos e elétricos.

apresenta notórias vantagens aos propulsores convencionais e do tipo Hall em termos de simplicidade do propulsor e design.

Este propulsor gera plasma em meio a uma fonte de helicon e acelera uma grande quantidade os íons de alta energia através de uma camada dupla LP. Esses íonn são acelerados pelo campo magnético divergente e pela queda de potencial pela camada dupla. A partir do citado, o resultado é que as energias de íons adquiridas no feixe de exaustão são de menores magnitudes aos dos propulsores de íons ou propulsores de Efeito Hall.

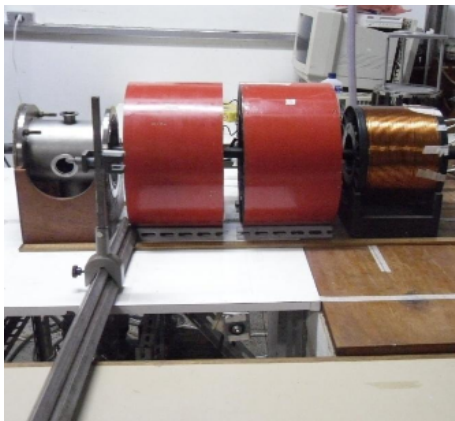


Figura 6. Propulsor Auroral da UnB

O feixe gerado é, também, macroscopicamente neutro. Em consequência disso, a superfície das naves espaciais não são tão prejudicadas, o que ocasiona em não precisar de um neutralizador externo. A baixa energia dos íons resulta em menor erosão do canal do propulsor, o que aumenta a vida operacional do equipamento.

Como citado acima, o propulsor apresenta um sistema mais simplificado, contendo menos elementos complexos o que implica, concomitantemente, a diminuição no número de

interatividades que desgastam o equipamento e que poderiam acometer em falhas no sistema e, assim, encerrando a vida útil do equipamento.

Além das vantagens já supracitadas o HDLT também pode funcionar com uma variedade de propulentes variados. O propulsor permite viagens espaciais de longa duração. Em causalidade dos fatos citados, o propulsor do tipo HDLT está sendo pesquisado e desenvolvidos por várias agências ao redor do mundo.

V. PROPULSOR PION

Os propulsores por bombardeamento eletrônico, junto aos propulsores Hall, são os principais sistemas de propulsão utilizadas nas viagens espaciais. Os propulsores eletrostáticos funcionam da seguinte procedimento:

- 1) O propelente gasoso entra na câmara de descarga, em fluxo controlado;
- 2) O cátodo primário, localizado no centro da câmara emite elétrons, ao qual são atraídos pelos para um anodo cilíndrico nas parades do recipiente;
- 3) Na trajetória entre cátodo e anodo, há eventuais choque entre as moléculas do gás com os elétrons, formando íons.
- 4) Esses Íons são atradídos por um fortíssimo campo elétrico na saída da câmara de ionização e atravessam as grades a grandes velocidades.
- 5) Após a saída do feixe iônico, é preciso neutralizá-lo, pode ser utilizado um catodo neutralizador externo à câmara.

Anteriormente, havia sido citado que o Mercúrio e o Césio eram utilizados como propulentes para os propulsores iônicos, entretanto, estes elementos corroíam as grades de saídas. A partir daí, os gases nobres foram utilizados cada vez em uma frequência maior, devido a sua baixa reatividade e eficiência.

Os propulsores que já utilizaram dessa tecnologia foram:

- 1) Deep Space 1 (1988);
- 2) XIPS;

Outro propulsor que está sendo desenvolvido com este tipo de tecnologia é o propulsor *PION*, pela Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Este protótipo foi construído empregando uma câmara cilíndrica de 7cm x 14cm e o empuxo realizado com argônio e com xenônio seje de $500\mu N$ e $1mN$, respectivamente. Ainda é conveniente citar que o projeto está em andamento, estando na sua quarta geração de propulsores.

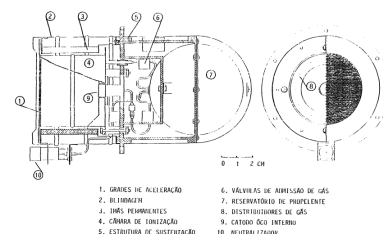


Figura 7. Modelo Estrutural do Propulsor PION

VI. CONCLUSÃO

Vendo a importância dos propulsores elétricos na exploração espacial é de suma importância o estudo da melhor aplicação de cada propulsor, para conseguirmos cada vez alcançar melhores observações, dados e viagens pelo universo.

Este assunto é de extrema riqueza tanto para os exploradores, em busca de novas informações sobre o cosmo, quanto aos criadores dos propulsores, com os desafios na montagem do sistema mais bem construído. Deixo meu obrigado ao professor pela oportunidade do aprendizado e vivência na área de plasmas/física.

REFERÊNCIAS

- [1] *LABORATÓRIO ASSOCIADO DE PLASMA - LAP/INPE Gerson Otto Ludwig (Coord.) , Relatório de atividades do laboratório associado de plasma do INPE no biênio 88/89, 1990, INPE .*
- [2] <https://brazilianspace.blogspot.com/2009/07/o-propulsor-ionico-do-inpe.html>. Blog de informações de propulsores eletrostáticos. Acessado 10/12/19 às 14:32.
- [3] <https://www.palazzo.pro.br/Wordpress/?p=5394> Informações sobre o TRL. Acessado dia 10/12 às 18:22.
- [4] SANDONATO, Gilberto. Projeto e Estudo de um Propulsor Iônico para Empuxo de Satélites Espaciais, ITA, 1993.
- [5] SOUZA, João. Estudo da Dinâmica de Partículas em um Propulsor a Plasma do tipo Hall com Ímãs Permanentes, 2004, UnB.
- [6] Jahn R. G. , Choueiri E. Y. Electric Propulsion, Encyclopedia of Physical Science and Technology, Third Edition, Volume 5. Princeton University, Academic Press, 2002.
- [7] Chen, Francis F. Introduction to plasma physics and controlled fusion. 2. ed. New york: Plenum, 1985. 2 v.
- [8] Choueiri E. Y. A Critical History of Electric Propulsion: The First 50 Years (1906– 1956), Journal of Propulsion and Power, Vol. 20, No. 2, March–April 2004.
- [9] Sabrina Pottinger, Vaio Lappas, Christine Charles, Rod Boswell. Performance characterization of a helicon double layer thruster using direct thrust measurements. Journal of Physics D: Applied Physics, IOP Publishing, 2011, 44 (23).
- [10] Chen, Francis F. Permanent magnet helicon source for ion propulsion. Electrical Engineering Department, University of California, Los Angeles, California.